

貯水池操作が全球の河川流量に与える影響の評価

AN ASSESSMENT OF THE IMPACT OF RESERVOIR OPERATION ON THE GLOBAL RIVER DISCHARGE

花崎直太¹ 鼎信次郎² 沖大幹³

Naota HANASAKI, Shinjiro KANAE and Taikan OKI

1 学生会員	東京大学生産技術研究所	(〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)
2 正会員 博士 (工学)	東京大学生産技術研究所講師	(〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)
3 正会員 博士 (工学)	総合地球環境学研究所助教授	(〒602-0878 京都市上京区高島町 335)

A global river discharge simulation is conducted taking into account the operation of 500 individual reservoirs. The operating rule for each reservoir is estimated by newly developed algorithm and available global datasets since actual operating rule is not published globally. In this algorithm, reservoir operation is categorized into 'irrigation purpose' and 'non-irrigation purpose.' The latter decreases inter-annual and seasonal fluctuation of discharge, and the former, in addition, supplies irrigation water to meet the demand in downstream. The simulation result is validated with observed data in three reservoirs in three basins, and judged sufficient for global study. Finally, the impact of reservoir operation on river discharge is assessed globally, by comparing RES simulation, global river discharge simulation with reservoir operations, and CTRL simulation, without operations. The result indicates that reservoir operations increase by 4-43 % of monthly discharge into oceans in maximum (the world ocean is divided into eight oceans), decrease by 1-7 %.

Key Words: Global river discharge simulation, reservoir operation, TRIP,
Global crop calendar, Global irrigation water demand

1. はじめに

現在世界には45000の大ダムがあり、それらの総貯水容量の総和は7000-8000km³に上ると報告されている¹⁾。これは世界の平均河道内貯水量推定値2120km³の3倍、同じく総年間河川流量40,000km³の約2割にのぼるため²⁾、貯水池操作は地球の河川システム、延いては地球の水循環システムにも影響を与えていると考えられる。

ダム・貯水池が河川や水循環に与える影響をグローバルに考察した研究はこれまでに少ない。Dynesius and Nilsson (1994)³⁾は北半球高緯度(メキシコ、アメリカ、カナダ、ヨーロッパ諸国、旧ソ連の共和国)の河川について河道の断片化(河川横断構造物のない最長区間)と流量調節の度合(貯水池操作、流域間分水、灌漑取水)を指標化し、河川への人為的影響を評価した。彼らの研究は河川への人為的影響を広域に評価した先駆的なものであるが、対象がデータの得やすい先進国に限られている上、貯水池の影響の評価についても流域の総貯水容量

と平均年流量の比をとっているに過ぎない。Vörösmarty *et al.* (1997)⁴⁾は世界622の貯水池を全球デジタル河道網地図に配置し、貯水容量を平均年流入量で除した「滞留時間」を貯水池ごとに計算することにより、貯水池の影響の評価を行った。彼らの研究は全球の貯水池を個々に扱ったところに先駆性があるが、やはり貯水容量と年流入量との関係を論じるに留まっている。

たしかに貯水容量と年流量を比較することにより河川における貯水容量の相対的大きさを示すことができ、それを流量調節能力と見立てることはできる。しかし、貯水池操作による流域・地球水循環へのダイナミックな影響や水需給バランスへの貢献を評価するには、放流・貯留操作により河川流量がいつ、どこで、どれだけ増減するのかをグローバルに明らかにする必要がある。そこで本研究はこのようなメカニズムを定量的に評価するための数値モデルを開発することを目的とする。

本研究がとる方法を示す。まず Vörösmarty *et al.* (1997)⁵⁾と同様に貯水池を全球デジタル河道網地図に配置

する。本研究で利用するのは全球河川モデル TRIP である。TRIP は空間解像度 $1^\circ \times 1^\circ$ の全球デジタル河道網地図を持ち、流出場を河道網に沿って流下させることにより流量計算を行う。ここで新たに貯水池を操作するプログラムを開発し TRIP に組み込むことにより、個々の貯水池で貯留・放流の操作を行いつつ、上流から下流へ向けて流量の計算を行う。最後に貯水池操作を考慮した計算としない計算を比較することにより、貯水池操作の影響を評価するものとする。本研究が Vörösmarty *et al.* (1997) と大きく異なる点は次の 2 点である。1 点目は個々の貯水池で操作を行い、その結果が流量計算に反映されることである。貯水池の貯水量は計算ステップごとに変化し、放流量は下流の河川流量に加算される。2 点目は 10 日単位の全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 格子の流出場データを用いて流量計算を行うことである (後述)。このように時間・空間解像度の高い流出データセットを利用することにより、個々の貯水池に時間変動を持つ流入量を与えることが可能になる。

2. モデルの構築

(1) 貯水池の配置

本研究で対象とする貯水池は World Register of Dams (WRD98) ⁶⁾ に掲載されているもののうち総貯水容量が 10 億 m^3 以上のものとする。条件を満たすダム (堤体) は 833 あった。この中から副ダム (一つの貯水池を複数のダムで構成する場合の補助的なダム) や記録上の重複を除去した正味の貯水池の数は 593 であった。次に WRD98 には緯度・経度の情報がなかったため、世界地図上で位置の確認を行った。この結果、緯度・経度が判明したものは 500 であり、TRIP の全球デジタル河道網地図に配置された。これらの貯水容量の総和は 4421 km^3 であるが、これは WRD98 に記載された全ての貯水池の総和 7200 km^3 の約 6 割を占め、十分な代表性があると考えられる。これらの位置情報に加え、WRD98 に掲載されていた名前、貯水容量、目的などがデータベース化された。

表 1 本研究で対象とする貯水池

WRD98 に掲載された ダム・貯水池	総数	貯水容量 [km^3]
1) ダムの総数	25,410	7200
2) 10 億 m^3 以上のダム	833	4700
3) 10 億 m^3 以上の貯水池	593	4700
4) 3) で緯度・経度が判明	500	4421

(2) 貯水池の操作

貯水池操作のモデル化は花崎ら (2003) ⁷⁾ を改良した。モデルを利用するのは現実の操作ルールが個々の貯水池

についてグローバルに入手できないからである。貯水池操作は貯水池の主目的が灌漑の場合とそれ以外の場合で分けて考える。

a) 年々変動緩和操作のモデル化 (共通部分)

まず貯水池への月間流入量と年平均流入量 (ともに後述する CTRL シミュレーションの結果) の関係からダムサイトの全ての月を式(1)のように豊水月 (flood) と渇水月 (drought) に分類する。

$$\begin{cases} i_i \geq i_{mean} & \text{flood} \\ i_i < i_{mean} & \text{drought} \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 i_i は i 月の流入量を、 i_{mean} は年平均流入量とする。ここで 1 年を主に豊水月からなる豊水期と主に渇水月からなる渇水期に二分し水文年を定義し、毎水文年の渇水期の始めに式(2)に示す放流係数 k_{rls} を設定しておく。

$$k_{rls} = S_{first} / 0.85C \quad (2)$$

ただし、 S_{first} は渇水期の最初の月の貯水量、 C は総貯水容量である。すなわち、渇水期の最初の月の貯水量が総貯水容量の 85% と等しければ k_{rls} は 1 に、多ければ 1 より大きく、少なければ 1 より小さくなる。花崎ら (2003) は Chao Phraya 流域での検証結果を元にこの閾値を 75% としていたが、世界の他の地域での検証から変更を行った。式(2)は現在線形になっているが、これも世界の複数の貯水池での検証から妥当性が確認されている。

b) 灌漑貯水池の場合

灌漑が主目的の貯水池は下流の灌漑需要水量をまかなうように放流操作を行うものとする。灌漑需要水量の計算には灌漑モデル CROPWAT ⁸⁾ を簡略化したものと流出場を計算する際に利用した地表面付近の気象データ ISLSCP-I CD-ROM (後述、全球月別 $1^\circ \times 1^\circ$ 格子) を利用する。

まず地表面付近の気象データと簡略化した Döll and Siebert (2002) ⁹⁾ のアルゴリズムを用い、全球の農事暦 (作付・収穫の時期を示したカレンダー) を作成する。作付作物は生産量の多い穀物のみを対象に水稲と水稲以外の 2 種類とし、どちらも栽培期間は 5 ヶ月間とする。

i 月に栽培を始めた場合の栽培適性は式(3)と式(4)によって表される O_i とする。

$$m_i = \sum_{k=i}^{i+4} (b_k + a_k) \quad (3)$$

$$O_i = \sum_{k=i-1}^{i+1} m_k \quad (4)$$

ただし、 i は栽培を始めた月、 b_k は気温による栽培適性 (基準点と名づける)、 a_k は河川流量による栽培適性 (追加点と名づける) である。基準点と追加点は表 2 で与え

られる。ただし表2の T_i は i 月の気温、 T_{mean} は年平均気温、 T_c は栽培に必要な最低月平均気温、 Q_i は i 月の流量、 Q_{mean} は年平均流量を示す。式(4)が必要なのは式(3)のみの場合、複数の栽培開始月で栽培適性が同点になることが多かったためである。陸域の全ての格子で O_i の最大値を探し、そのときの i を栽培開始月とする。ただし、 O_i が負になる場合は栽培を行わない。

表2 基準点・追加点の配点表

基準点(b)		追加点(a)	
気温	点数	流量	点数
$T_{\text{mean}} < T_i$	2	$Q_{\text{mean}} < Q_i$	1
$T_c \leq T_{\text{mean}} < T_i$	1	$Q_i \leq Q_{\text{mean}}$	0
$T_i \leq T_c$	-14		

つぎに二期作の場合は式(5)を用いる。

$$D_{i,j} = \sum_{k=i}^{i+4} (b_k + a_k) + \sum_{l=j}^{j+4} b_l \quad (5)$$

ここで右辺第一項が二期作中の雨期作を、第二項が乾期作を示す。ここで $l=j:j+4$ は $k=i:i+4$ 以外の7ヶ月のうち連続する5ヶ月をとるものとする。第一項、第二項がともに正でかつ最大をとる $D_{i,j}$ を探し、 i を雨期作の開始月、 j を乾期作の開始月とする。得られた農事暦は紙面の都合上ここで示さないが、Döll and Siebert (2002) と比較した結果、良好な対応が見られた。

農事暦が定まったので次に簡略化した CROPWAT を利用して灌漑需要水量の計算を行う。灌漑需要水深 d_{cWD} [mm/day] は次のように表される。

$$d_{\text{cWD}} = \frac{(k_c E_{\text{pot}} + d_{\text{perc}} + d_{\text{prep}}) - P_{\text{eff}}}{k_{\text{eff}}} \quad (6)$$

ここで k_c は作物係数 (作物の生長段階に応じて蒸発散量を変化させるための係数。無次元)、 E_{pot} は可能蒸発散量 [mm/day]、 d_{perc} は浸透損失 [mm/day] (水稲のみ、水田の水位を維持するための水量)、 d_{prep} は耕作準備期間の必要水量 [mm/day] (水稲のみ、水田に最初に水を張るための水量)、 P_{eff} は有効降雨 [mm/day] (遮断蒸発と表面流出を差し引いた降雨量)、 k_{eff} は灌漑効率 (取水されたうち有効に使われる水量の割合) である。

E_{pot} は式(7)に示す FAO Penman-Monteith 法に地表面付近の気象データを代入して計算を行った。

$$E_{\text{pot}} = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (7)$$

ただし、 Rn は正味放射量 [$10^6 \text{Jm}^{-2} \text{day}^{-1}$]、 G は地中熱輸送量 [$10^6 \text{Jm}^{-2} \text{day}^{-1}$]、 T は気温 [K]、 U_2 は地上 2m の風速 [m/s]、 e_a は飽和水蒸気圧 [10^3Pa]、 e_d は水蒸気圧 [10^3Pa]、

Δ は飽和比湿の温度に対する変化率 $\gamma = C_p / l$ は水の気化熱に対する空気の熱容量 [10^3Pa/K] である。

P_{eff} は式(8)で示されるアメリカ連邦農業局(USDA)の Soil Conservation Service Method を利用した。

$$P_{\text{eff}} = \begin{cases} P(1 - 0.048P) & P < 8.3 \text{ mm/day} \\ 4.17 + 0.1P & P \geq 8.3 \text{ mm/day} \end{cases} \quad (8)$$

ただし、 P は降雨量 [mm/day] である。

係数 k_c 、 d_{perc} 、 k_{prep} は Smith(1992)の代表値を使い、表3・表4のようにした。 k_{eff} は全球一律に 0.5 とした。これらの諸係数は地域、栽培作物・品種により大きなばらつきがあると考えられるが、詳細なグローバル農業データが入手できなかったため、全球一律にこれらの値を用いることにする。

表3 水稲の場合の諸係数

耕作月	1	2	3	4	5
k_c	0.5	1.2	1.2	1.2	0.5
d_{perc} [mm/day]	0	1.5	1.5	1.5	0
d_{prep} [mm/day]	6.0	0	0	0	0

表4 水稲以外の場合の諸係数

耕作月	1	2	3	4	5
k_c	0.5	1.0	1.0	1.0	0.5
d_{perc} [mm/day]	0	0	0	0	0
d_{prep} [mm/day]	0	0	0	0	0

貯水池に対する灌漑要求水量は q_{dem} [m^3/s] は式(9)のように表される。

$$q_{\text{dem}} = k_{\text{alc}} \times k_{\text{dep}} \times d_{\text{cWD}} \times k_{\text{area}} \times a \quad (9)$$

ここで k_{alc} は上流に複数の貯水池がある場合の配分を示す係数 [0-1]、 k_{dep} は灌漑用水需要の貯水池への依存度 (地下水や自然の河川水で灌漑を行う部分を除く) を示す係数 [0-1]、 k_{area} は灌漑面積のうち実際に耕作が行われている割合を示す係数 [0-1]、 a は Döll and Siebert(2000) ¹⁰ による灌漑面積である。 k_{alc} は貯水池の平均年流量の比で与える。 k_{dep} と k_{area} の設定は大変難しいが、現在灌漑農業の約3割が貯水池に依存しているという WCD (2000)の記述に基づき、全球一律に

$$k_{\text{dep}} \times k_{\text{area}} = 0.3 \quad (10)$$

とみなした。

最後に貯水池の i 月の放流量 r_i は次式で表される。

$$r_i = k_{\text{rls}} \times q_{\text{dem}} \quad (11)$$

k_{rls} をかけることにより、放流量に貯水量を反映している。

c) 灌漑以外の貯水池

貯水池の主目的が灌漑以外の場合、貯水池への年平均流入量を毎月一定放流するものとする。

$$r_i = k_{rls} \times r_{mean} \quad (12)$$

ここで r_{mean} は貯水池への年平均流入量 [m^3/s] である。 k_{rls} をかけることにより、放流量に貯水量を反映している。貯水量が貯水容量を上回る場合は上回った分だけ追加放流が行われる。

3. シミュレーションの設定

モデルに与える流出場データは Global Soil Wetness Project (GSWP) ¹¹⁾ で用意された 1987 年から 1988 年の 2 年分の 10 日おき全球流出場データである。このデータは International Satellite Land-Surface Climatology Project (ISLSCP) ¹²⁾ の製作した土壤・植生パラメータと地表面付近の気象データを 11 の陸面過程モデル (LSM) にフォーシングして得られたものである。本研究ではこの中から日本気象庁の SiB を利用して得られた結果を利用する。

流量計算は上流から下流に向けて行われる。計算格子に貯水池が配置されている場合は格子への流入流量を貯水池への流入量とし、前節で述べられた操作方法に従い放流量計算を行う。貯水池からの放流量がその格子の流出流量である。計算のタイムステップは 12 時間で、流速は全球一律 $0.5[m/s]$ を仮定した。TRIP による全球流量シミュレーションについては Oki et al(2001) ¹³⁾ を参照されたい。ここで貯水池操作を行わない場合のシミュレーションを CTRL、行う場合のシミュレーションを RES と名づける。貯水池の初期貯水量の推定のために 1987 年の流出量データを利用してスピナップを行った。

4. モデルの検証

シミュレーション結果の妥当性を示すため、表 5 に示す 3 流域で貯水池操作と下流の河川流量それぞれについて計算値の検証を行った。

表 5 検証地点

河川名	検証地点名	
Chao Phraya (タイ)	貯水池(目的)	Sirikit (灌漑)
	流量観測点	Nakhon Sawan
Colorado (アメリカ)	貯水池(目的)	Glen Canyon (発電)
	流量観測点	Little Colorado
Missouri (アメリカ)	貯水池(目的)	Oahe (治水)
	流量観測点	Yankton

図 1 に Sirikit 貯水池の操作結果を示す。上図は放流量 (太線) と流入量 (細線) を、下図は貯水量を示してい

る。両者とも実線は計算値、破線は観測値である。放流量計算は季節変動の特徴をよく捉えている。しかし貯水量に関する計算には現実と大きな乖離がある。まず初期貯水量 (1987 年 1 月時点) であるが観測値が $6300 \times 10^6[m^3]$ に対し、推定値は $7700 \times 10^6[m^3]$ であり、約 20% の過大評価となっている。スピナップは年々の変動が少ない場合に有効な初期値推定方法であるが、年々変動が大きい大貯水池の貯水量を推定するにはより適切な方法の開発が必要である。そして 1987 年の貯水量が乾期 (1 月～8 月) に急減するのは放流量の計算値を観測値に比べ大きく見積もったためである。1987 年の年間放流量の計算値は $5640 \times 10^6[m^3/year]$ 、観測値は $4320 \times 10^6[m^3/year]$ であった。放流量を過大に見積もった原因は二つ考えられる。一つは初期貯留量が過大で水文年の始まる 1 月に計算される k_{rls} が大きくなったこと、もう一つは Chao Phraya 川において $k_{dep} \times k_{area} = 0.3$ が過大だったことである。

図 2 は下流の Nakhon Sawan での流量計算結果である。太い実線は RES 計算値、細い実線は CTRL 計算値、破線は観測値を示す。RES の結果には CTRL では現れなかった乾期のピークが再現されていたり、雨期のピークが緩和されていたりと季節変動の再現性が向上していることが確認される。ただし 1987 年の RES の年平均流量 ($770[m^3/s]$) は上流の貯水池の過大な放流を受けて、CTRL (同 $590[m^3/s]$) を約 30% 上回ってしまっている。

図 3 に Glen Canyon 貯水池の操作結果を示す。灌漑目的の貯水池ではないため、年平均流量に放流係数をかけた量が毎月一定に放流されている。1 年目の 1987 年に見える放流量の 2 つのピークは貯水量が貯水容量を上回ったため生じている。このときの流入量の計算値は実測値に比べ過大であるが、これは入力する流出場データの問題であり、放流量・貯水量のシミュレーションは妥当と考えられる。

図 4 は下流の Little Colorado での流量を示している。CTRL の流量は極めて大きな季節変化をもっていたが、RES は流量が平均化され、観測値と良好な対応を見せている。ただしここでも流量の系統的な過大評価が見られる。

図 5 に Oahe 貯水池の操作結果を示す。Oahe 貯水池の上流には二つの大貯水池があり、流入量の季節変動は小さくなっている。計算値は放流量を一定にしているが、観測値は冬期に少なめに、夏季に多めに放流している。これは現実には冬期に河川が凍結するため放流量を抑える操作、夏季に舟運を行うため流量の減少する秋に向けて流量を増やす操作、上下 6 貯水池での統合的な操作が行われているからと考えられる。しかし観測流量の季節変動は最大でも $\pm 20\%$ 割程度であり、放流量を年間一定としても十分な再現性を示すと判断した。

図 6 は下流の Yankton での流量である。観測値には 4 月頃から 10 月頃にかけて流量が漸増し、11 月に急落

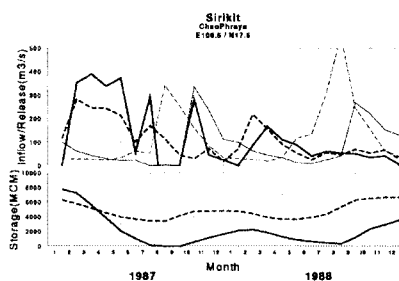


図1 Sirikit 貯水池の操作

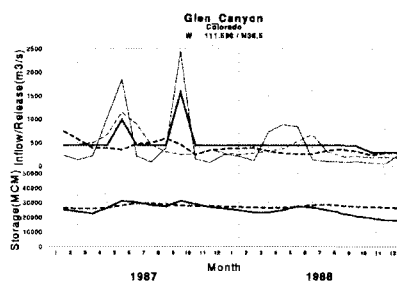


図3 Glen Canyon 貯水池操作

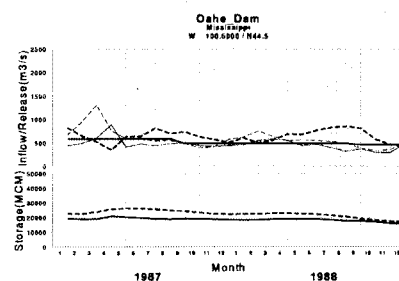


図5 Oahe 貯水池の操作

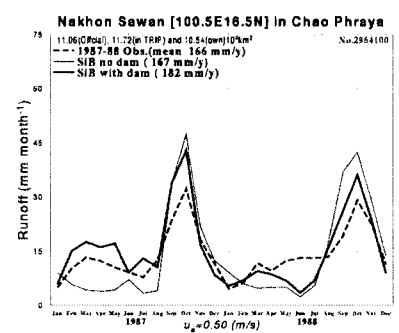


図2 Chao Phraya 川 Nakhon Sawan での流量

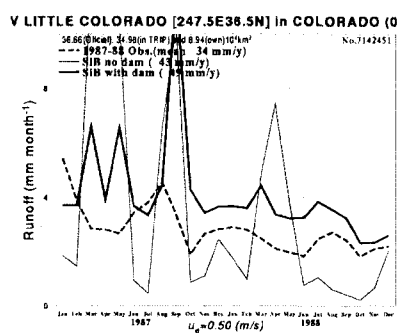


図4 Colorado 川 Little Colorado での流量

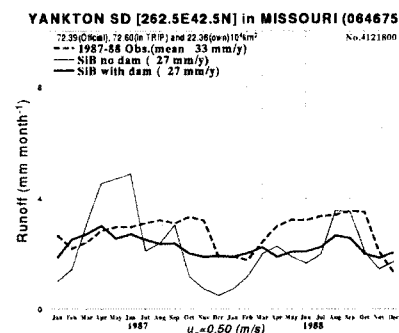


図6 Missouri 川 Yankton での流量

するパターンが見られる。これは前述した河川凍結や舟運と関係があると考えられる。この流域の場合年流量は過小評価されていることが分かる。

3流域の3貯水池の貯水池操作と3地点の流量を検討してきたが、いずれも貯水池下流の季節変動パターンは貯水池を考慮することにより、観測値に近づくことが示された。しかし流量そのものは観測値との乖離が大きい場合があり、貯水池操作の再現性向上のためにも、流出場の改善が今後の課題として残された。

5. 結果と考察

本報では紙面の都合上、貯水池操作のグローバルな水循環への影響に絞って議論を進める。貯水池操作によるグローバルな水循環への影響を調べるために海洋を図7に示すように8海域(北極海、北・南太平洋、北・南大西洋、北・南インド洋、南極海)に分割し、それぞれに流入する河川流量について考察を行う。解析には1987年の計算値を用いた。

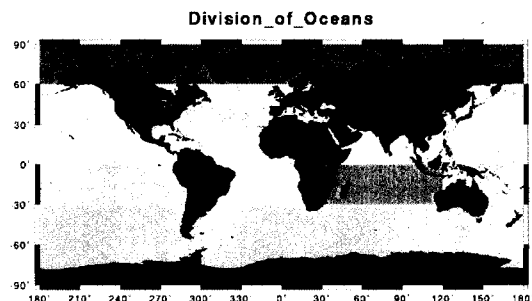


図7 海洋の分割

結果を示した表6の見方を説明する。「貯水池の数」と「貯水池の容量」は各海域に流れ込む河川を持つ貯水池についてのデータである。内陸河川を持つ貯水池は除去されている。「流量増加率最大月」とは海洋へ流れ込むRES流量のCTRL流量に対する比が最大となる月、「流量減少率最大月」とはその比が最小になる月に関するデータである。「月」の欄は当該月を示し、括弧付になっているのはCTRL流量がそれぞれ年間最小・最大になる月である。「CTRL」「RES」はそれぞれCTRL、SIM流量[km³/month]である。「R/C」はRES流量をCTRL流量で除した値で、これが100%より大きければ貯水池放流により流量が増加したと、小さければ貯水池貯留により流量が減少したと解釈することができる。

まず流量増加率最大月に着目する。流量増加率最大月はおおむねCTRL流量の最小月と一致しており、自然流量が最小になる月に貯水池放流による効果が最大になっていると解釈することができる。その増加率は貯水池数が著しく少ない南太平洋を除くと4%から43%程度であることが示されている。

次に流量減少率最大月に着目する。流量減少率最大月はCTRL流量の最大月とは必ずしも一致しない。これは海域を広く取っているため、流量がピークに達する時期にばらつきがあるのが理由と考えられる。減少率は北インド洋を除くと、1%から7%程度である。増加率・減少率はCTRL流量との相対値であるため、減少率は増加率よりも小さな値をとっている。

表6 各海域へ流入する河川流量

	貯水池 の数	貯水池 の容量 [km ³]	流量増加率最大月				流量減少率最大月			
			月	CTRL	RES	R/C	月	CTRL	RES	R/C
				[km ³ /month]				[km ³ /month]		
北極海	28	644	4(3)	25.10	35.93	143%	9(7)	402.27	382.05	95%
北太平洋	109	772	3(3)	186.08	195.59	105%	7(6)	493.62	480.32	97%
南太平洋	5	16	6(9)	94.55	95.57	101%	10(2)	30.09	29.09	97%
北大西洋	178	1568	2(2)	269.62	259.19	104%	5(5)	1297.97	1281.71	99%
南大西洋	26	158	9(9)	87.47	109.28	125%	2(4)	180.30	168.53	93%
北インド洋	67	569	1(2)	81.07	100.13	124%	7(8)	467.06	408.94	88%
南インド洋	12	253	9(9)	46.15	50.35	109%	5(2)	196.86	189.35	96%
南極海	66	402	11(11)	132.20	164.61	125%	5(5)	235.75	220.57	94%

6. まとめと今後の課題

世界の500の貯水池をTRIPの全球デジタル河道網に配置し、貯水池操作ルールをモデル化することにより、貯水池操作を考慮した全球河川流量シミュレーションを行った。そして貯水池操作を考慮する場合としない場合のシミュレーション結果を比較し、全球の河川システムに対する貯水池操作の影響を定量的に示した。

本研究には多くの課題がある。まずは貯水池への流入量の再現性が低く、放流量や貯水量の計算に悪影響を与えていることが明らかになった。この問題の解決にはそもそもTRIPに与える流出場の改善が必要である。特に貯水池は多くの場合流域の上流に位置するため、山岳域や小流域での流出量の再現性を上げることが重要である。また開発した貯水池操作モデルに関してはさらなる改善が必要である。まず灌漑以外の操作モデルを充実させることが課題となった。また流入量の再現性が必ずしも高くないことが示されたため、現実より過小、あるいは過大な流入量に対しても合理的な操作を行うための放流量、貯水量の安定化スキームの開発も検討したい。最後に本研究の最大の課題は検証事例が少ないことである。これは第2章にも述べたとおり、現在公開されている貯水池操作データが極めて少ないためであるが、引き続き長期の貯水池操作データを収集して検証事例を増やしたい。

謝辞：本研究は科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業「人間活動を考慮した世界水循環水資源モデル」(代表：沖大幹)の成果の一部です。検証に利用したデータはタイ発電公社、GAME-T データセンター、アメリカ内務省開墾局、陸軍工兵隊からご提供頂きました。ここに記して関係者の皆様に深謝申し上げます。

参考文献

- 1) World commission on dams.: Dams and development: A new framework for decision making, WCD, 2000.
- 2) Korzun, V. I.: World water balance and water resources of

the earth, UNESCO, 1978.

- 3) Dynesius, M. and Nilsson, C.: Fragmentation and flow regulation of river systems in the northern third of the world, *Science*, Vol.266, pp.753-762, 1994.
- 4) Vörösmarty, C. J., K. P. Sharma, B. M. Fekete, A. H. Copeland, J. Holden, J. Marble, J. and A. Lough.: The storage and aging of continental runoff in large reservoir systems of the world, *Ambio*, Vol.26, pp.210-219, 1997
- 5) Oki, T. and Sud, Y. C. Design of Total runoff integrating pathways (TRIP) –A global river channel network. *Earth Interactions*, Vol.2, 1999. <http://EarthInteractions.org>
- 6) International Commission on Large Dams.: World Register of Dams, ICOLD, 1998.
- 7) 花崎直太、鼎信次郎、沖大幹、虫明功臣：グローバルに適用可能な貯水池操作モデルの開発、*水工学論文集*, Vol.47, pp.181-186, 2003.
- 8) Smith, M.: CROPWAT, A Computer Program for Irrigation Planning and Management. *FAO Irrigation and Drainage Paper*. Vol.46, 1992.
- 9) Döll, P and Siebert, S. Global modeling of irrigation water requirements. *Water Res. Res.*, Vol.38/4, pp.8-1-10, 2002.
- 10) Döll, P and Siebert, S. A digital map of irrigated areas. *ICID J.* 49(2) 55-66. 2000.
- 11) Dirmeyer, P. A. Dolman, A. J. and Sato, N. The pilot phase of the global soil wetness project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol.80, pp.851-878, 1999.
- 12) Meeson, B. W., Corprew, F. E., McManus, J. M. P., Myers, D. M., Closs, J.W., Sun, K. J., Sunday, D. J. and Sellers, P. J. ISLSCP Initiative I – Global datasets for land-atmosphere models, 1987-1988, Vol.1-5, NASA, CD-ROM. 1995.
- 13) Oki, T., Agata, Y., Saruhashi, T., Yang, D. and Musiak, K.: Global assessment of current water resources using total runoff integrating pathways, *Hydrol. Sci. J.*, Vol.46/6, pp.983-995, 2001.

(2003.9.30 受付)